doi:10.13866/j.azr.2019.06.12

潜在蒸散发估算的简化方法及其应用[①]

张　颖[1,2]，　郝兴明[1]，　花　顶[1,2]，　孙海涛[1,2]，　李玉朋[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；
2. 中国科学院大学，北京　100049）

摘　要： 潜在蒸散发在区域水量平衡、干旱程度评价、农作物需水量等方面的研究中具有重要的作用。然而，潜在蒸散发的空间化处理一直以来都是相关研究面临的一个挑战。基于新疆地区1960—2017年66个气象站的观测数据，通过一种简单的参数方程，实现了潜在蒸散发（ET_0）的空间化处理。研究结果表明：① 简化参数方程中的2个重要参数a，c的空间分布呈现一定的规律，参数a在空间上呈现东南高，西北低的特点；参数c则随海拔的增加而增大。② 简化参数方程与Penman-Monteith方法相比，拟合结果在日、月和季节尺度上的R^2值均大于0.90，且R^2值随时间尺度的增加而增大。③ 将简化参数方程的拟合结果与CRU数据和MOD16A2数据进行对比发现：简化参数方程与Penman-Monteith方法拟合的R^2值较高，拟合效果和偏差指标表现更佳，而CRU、MOD16A2数据拟合的R^2值较低。简化参数方程所获得的潜在蒸散发精度高且空间分辨率更高（500 m×500 m），是一种适用于新疆地区潜在蒸散发估算的简便有效的方法。

关键词： 潜在蒸散发（ET_0）；参数方程；Penman-Monteith公式；空间插值

潜在蒸散发是指具备充分土壤水分条件下垫面的全部蒸发量[1]。它是区域水分循环和能量平衡的重要环节，对地区干旱程度评价、农业灌溉管理、水文模型建立、气候变化影响等方面的研究具有重要意义[2-5]。潜在蒸散发也被称作参考作物蒸散发，用ET_0表示。ET_0的计算方法较多，但认可度高且常用的方法为Penman-Monteith公式（PM公式）[6]，它是联合国粮农组织计算潜在蒸散发的首选公式[7]。PM公式基于物理常量来计算ET_0，需要测量某地区的众多气候要素，包括气温、净辐射、日照时数、风速、空气相对湿度[7]。PM公式计算的ET_0常常作为与其他模型结果比较的基准[8-10]。但是，由于PM公式的计算需要较多气象观测数据，因此，在一些缺少资料的地区应用就受到了极大的限制[11]。针对这种情况，一些替代性公式开始出现。这些公式可概括为2种类型，一是基于温度的计算方法[12-13]；二是基于温度和辐射的计算方法[14-15]。前者使用气温数据计算，后者则是使用气温和总辐射计算ET_0值。然而，由于这些计算方法发展于特定的气候条件和地区，其模拟结果会因不同地区的气候条件而产生偏差，因此，更多的研究开始针对本地ET_0模型的校准工作。Allen等[16]首次将这类模型用于当地ET_0估算，他们利用当地关于风速的函数校准并验证了Blaney-Criddle模型对彭曼数据的有效性，并且用日蒸渗仪测量了苜蓿的蒸散量。类似的模型还有Blaney-Criddle模型[13]、Priestley-Taylor模型[14]、Thornthwaite模型[17]和Hargreaves参数方程[18]。近年来，经PM公式改进的三参数和两参数模型[8,11,19]因其计算方式简便，数据容易获取，故被广泛应用于气象站点数据不完善或气象数据获取难的地区的ET_0估算。

除了模型模拟和校准ET_0数据，潜在蒸散发空间数据产品，例如GLDAS[20]、CRU[21]、MOD16A2[22]等是目前使用较多的可靠空间数据集。但由于这些数据产品空间分辨率和时间分辨率较低[23]，一定程度上限制了它们的广泛应用。针对此，有研究利用简化参数模型，通过实现温度和总辐射空间化，进而对ET_0进行空间插值运算，得到了更高分辨率的潜在蒸散发的空间化产品[4]。

本研究旨在利用简化参数方程进行新疆地区

① **收稿日期：** 2018-12-05；　**修订日期：** 2019-01-15
基金项目： 国家自然科学基金（41571109）；中国科学院A类战略性先导科技专项（XDA20100303）资助
作者简介： 张颖（1994-），女，硕士研究生，研究方向为生态水文与植物生理生态. E-mail：zhangying16@mails.ucas.ac.cn
通讯作者： 郝兴明. E-mail：haoxm@ms.xjb.ac.cn

ET_0 的计算与空间插值,并通过与 PM 公式计算结果的对比,评价简化参数方程在站点尺度上的估算精度。利用决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)、相对偏差(BIAS)等指标评估基于简化参数方程的 ET_0 空间数据与 CRU 和 MOD16A2 数据产品的拟合精度与偏差,评估简化参数方程在新疆地区的适用性。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究采用新疆地区 66 个气象站点(图 1)所记录的每日平均气压、气温、相对湿度、风向风速和日照时数等数据。数据来源于中国气象数据共享网(http://data.cma.cn)。新疆地区的潜在蒸散发空间数据分别来自时序为 1961—2014 年的 CRU TS 3.2月尺度 ET_0 数据(http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_3.23/data/)和 MOD16A2 提供的 2000—2014 年全球 ET_0 月尺度数据(http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/MOD16A2_MONTHLY.MERRA_GMAO_1kmALB/GEOTIFF_0.5degree/),它们的空间分辨率均为 0.5°×0.5°。

1.2 研究方法

1.2.1 简化参数方程及拟合效果评估方法 在气象要素缺少的地区,PM 公式的应用受到限制。针对此,有研究者提出仅依赖于温度和总辐射计算 ET_0 的新方法[19]。简化参数方程〔以下简称参数方程,公式(1)〕与经典 PM 公式[7]有一定关系,其中 aR_a 代表 PM 公式中辐射项,表示输入辐射与输出辐射的差值。$(1-cT)$ 是 PM 公式中分母项的近似值[19]。参数方程公式如下:

$$PET = \frac{aR_a}{1 - cT} \tag{1}$$

式中:PET 指参数方程计算的潜在蒸散发值;T 指该站点的每日平均气温(℃);R_a 是指理想大气晴天下各站点每日大气上界的总辐射量(MJ·m^{-2}·d^{-1}),与当地纬度和太阳高度角有关,用公式(2)计算得到。

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)] \tag{2}$$

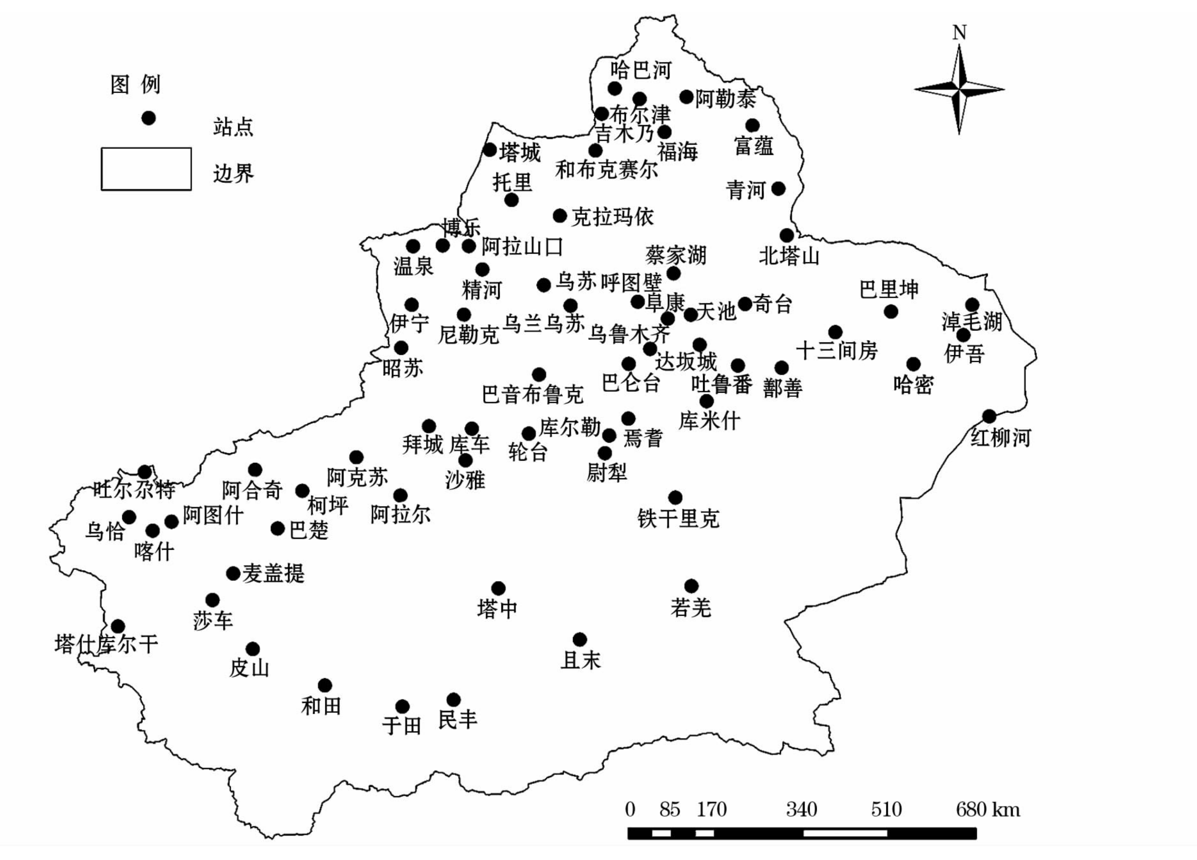


图 1 新疆地区 66 个站点空间分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of 66 meteorological stations in Xinjiang

式中:G_{SC}是太阳常数等于 82 kJ·m^{-2};d_r 是日地平均距离的倒数;ω_s 为当地太阳高度角;φ 是地理纬度;δ 为太阳赤纬角,以上 3 个变量单位为弧度(rad),d_r 和 δ 由日序数计算得到,而 ω_s 由地理纬度和日序数计算得出[6],R_a 的计算在 MATLAB 软件中实现。参数 a(kg·kJ^{-1})和参数 c(℃$^{-1}$)是由联合国粮农组织提供的 FAO－56 Penman-Monteith 公式[7]计算的 ET_0 拟合得到,采用 SigmaPlot11.0 中非线性方程拟合实现。公式如下:

$$f(x_1,x_2)=\frac{ax_1}{1-cx_2} \tag{3}$$

式中:x_1 表示每日总辐射 R_a;x_2 表示每日平均气温 T(℃);$f(x_1,x_2)$是 PM 公式计算得到的每日 ET_0。分别给参数 a、c 赋值为 0.000 1 和 0.01,得到与站点一一对应的参数 a、c。

PM 公式计算得出的 ET_0 值简写为 ET_{0_pm},与参数方程计算的 ET_0(ET_{0_mod})进行对比,使用决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)、相对偏差(BIAS)来评价和校准参数方程在模拟估计 ET_0 时的拟合效果[8]。其中,R^2 越接近 1,代表拟合效果越佳,平均绝对误差 MAE(mm)与相对偏差 BIAS(%)越小,表示 ET_{0_pm}和 ET_{0_mod}间的偏差值越小。

1.2.2　空间插值方法　参数方程实现 ET_0 的空间化需要以下几个步骤。首先,使用 Anusplin 软件对每日平均气温进行空间插值,该软件采用的插值方法是薄板样条函数法[24]。然后,基于日序数和地理纬度,利用公式(2)在 ArcGIS 软件中实现每日总辐射 R_a 的空间栅格运算。

最为关键的 2 个参数 a、c 空间化的具体步骤为:① 将 a、c 分别与站点经度、海拔和温度进行回归分析,建立参数 a、c 的拟合方程;② 基于该拟合方程和相关因子进行参数 a 和 c 的栅格运算,标记为 a'和 c';③ 以 a'和 c'作为协同变量,采用样条曲线法进行参数 a、c 空间插值。最后,基于每日平均气温 T、总辐射 R_a 和参数 a、c 的空间插值结果,利用参数方程(1)进行 ET_{0_mod}空间栅格运算,得到新疆全区的 ET_0 空间分布。

2　研究结果

2.1　不同时间尺度下 ET_{0_mod}与 ET_{0_pm}的分析对比

由图 2 可以看出,采用参数方程计算的 ET_{0_mod}与 PM 公式计算的 ET_{0_pm}结果趋势一致,精度较高。在日时间尺度上,ET_{0_mod}表现为高估的时间段主要为年初(1～86 d)、年中(167～230 d)和年末(300～365 d),平均高估幅度为 0.28 mm;其余时间段 ET_{0_mod}则表现为低估状态,平均低估幅度为0.25 mm。总体上,ET_{0_mod}表现为高估状态,平均高估 0.08 mm(图 2a)。在月时间尺度上,ET_{0_mod}与 ET_{0_pm}相比,在 4 月、5 月、8 月、9 月、10 月表现为低估,平均低估 7.47 mm,低估幅度最大为 10.19 mm。与此相对,在其余月份 ET_{0_mod}则表现为高估状态,平均高估 7.74 mm,最大高估幅度 12.19 mm(图 2b)。在季节尺度上,ET_{0_mod}与 ET_{0_pm}相比趋势最为接近,总体上 ET_{0_mod}高估了 5.31 mm(图 2c)。平均绝对偏差 MAE 的年内变化(图 2a)和月尺度变化(图 2b)都随着时间的增加而上下波动,1 月、4 月、7 月、9 月和 12 月在波峰,3 月、6 月、8 月、10 月处在波谷;并且季节尺度上(图 2c),MAE 冬季最高,夏秋季节最低。

此外,基于站点数据计算的多年日、月、季节的

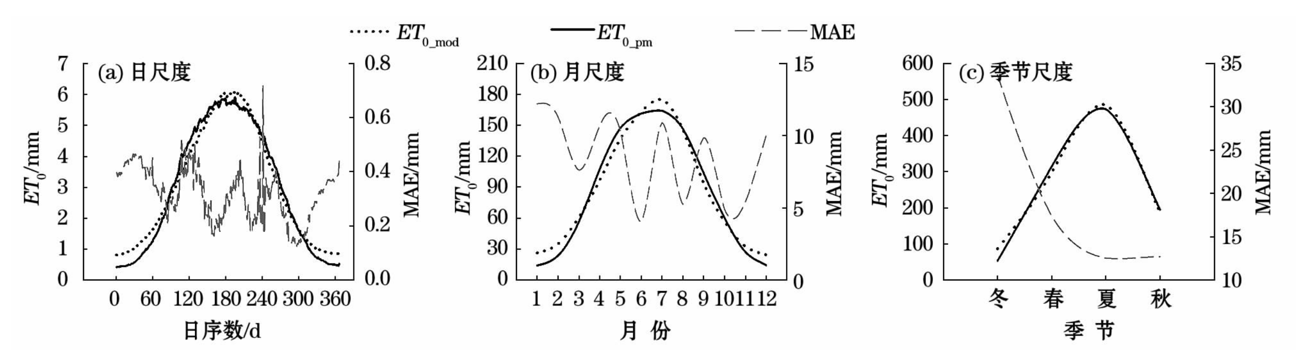


图 2　不同时间尺度 PM 公式计算的潜在蒸散发(ET_{0_pm})与参数方程 ET_0 值(ET_{0_mod})的年内平均变化和平均绝对偏差(MAE)

Fig. 2　Compared results of the potential evapotranspiration (ET_{0_pm}) calculated by the PM formula and the ET_0 value of the parametric equation (ET_{0_mod}) at different time scales and mean absolute error (MAE) trend

ET_{0_mod}与ET_{0_pm}之间的决定系数R^2评价结果表明，R^2值在日尺度、月尺度和季节尺度分别为0.991、0.991、0.993，拟合精度会随时间尺度增加而增加。因在月尺度下，ET_{0_mod}与ET_{0_pm}在66个站点上的决定系数R^2平均值为0.94，有33.33%的站点ET_{0_pm}与ET_{0_mod}的R^2值大于0.95，有57.09%的站点R^2值介于0.92～0.95之间，仅有3.03%的站点R^2值小于0.90。因此，笔者采用月尺度下的ET_{0_pm}来校准评价参数模型下的ET_{0_mod}值，并计算各个站点参数a、c的值。

ET_{0_mod}与ET_{0_pm}在各个站点上的平均绝对偏差(MAE)与相对偏差(BIAS)可以反映出参数方程与PM公式的偏差程度(图3)。评价结果表明：① 新疆66个站点的MAE均值为0.38 mm，其中MAE大于0.50的站点占总数的12.12%；MAE介于0.40～0.50的站点占总数18.18%；MAE介于0.20～0.40的站点占总数65.15%；而MAE介于0.10～0.20的站点占总数的4.55%。总体上，超过59.98%的站点MAE值小于0.40，因此，MAE总体较小。② 66个站点的BIAS均值为0.016 0，其中大于0.04的站点占总数1.52%；介于0.02～0.04之间的站点占总数的37.88%；0.01～0.02之间的站点占总数的37.88%；小于0.01的站点占总数的22.72%。总体上，有超过50.00%的站点相对偏差值小于0.02，偏差较小，说明拟合效果较优。③ 全疆MAE空间分布(图3a)表明，北疆大部分站点MAE偏高，南疆站点MAE相对较低，其中塔中站MAE最低，为0.16 mm；全疆BIAS空间分布和MAE类似(图3b)，北疆多数站点BIAS偏高，南疆多数站点BIAS值偏低。

2.2 参数a、c和ET_0的空间分布特征

将参数方程与PM公式计算的每月ET_0均值进行拟合，得到各个站点的参数a、c值，参数a最大值为0.000 1，最小值为0.000 047；参数c最大值为0.04，最小值为0.015。运用样条曲线法对2个参数进行空间插值，得到参数a、c的空间分布规律(图4a、4b)。结果表明：参数a的空间分布与太阳辐射相关，在低纬度地区太阳辐射越高，a值则越大，而高纬度地区太阳辐射较低，参数a也随着辐射的降低而减小，其空间变化呈现东南高，西北低。而参数c则与海拔相关性高，c的分布会随着海拔高度的变化而变化，海拔越高c值越大，海拔越低c值越小。

由参数方程空间插值得到的新疆地区全年和7月ET_0空间分布表明：

(1) 1960—2017年新疆地区多年平均ET_0为1 028 mm，并且存在显著空间差异(图4c)。从全疆来看，平原区年均ET_0为1 130 mm，山区为864 mm，平原区的蒸发量远远大于山区。平原区的全年温度高，降水稀少，蒸发过程强烈，而山区温度随着海拔的升高而降低，温度整体较低，且降水较多，蒸发过程较弱。

(2) 南北疆的多年平均ET_0也存在明显差异(图4c)，南疆地区年均ET_0值为1 047 mm，北疆地区为996 mm。在南疆平原区，ET_0达到1 187 mm；南疆山区潜在蒸散发较低，为899 mm。北疆平原区多年平均ET_0为1 076 mm，山区为780 mm。新疆地区ET_0空间变化趋势差异显著，主要原因是：南疆地处暖温带，有塔克拉玛干沙漠，气候干燥少雨，全

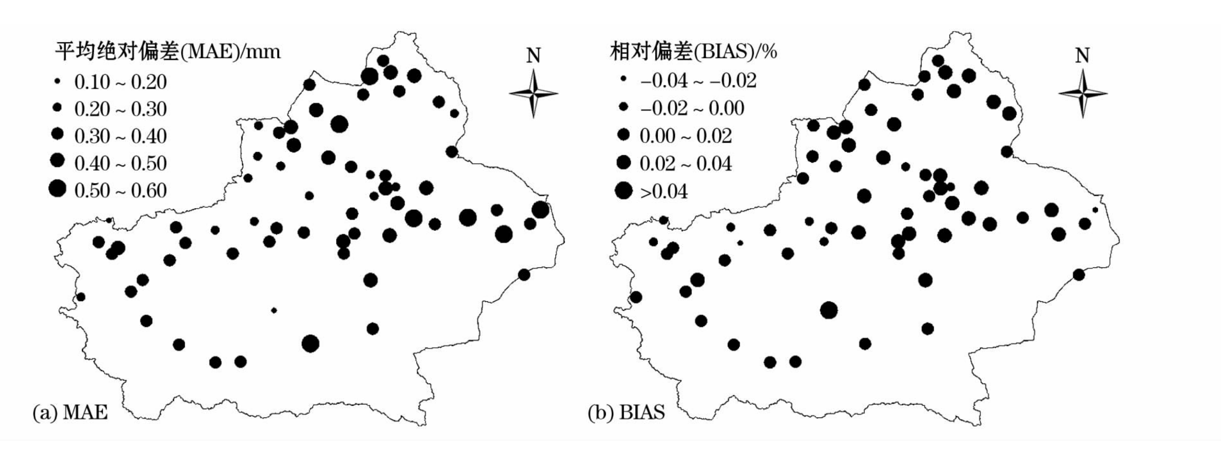


图3 新疆66个站点在月尺度下平均绝对偏差(MAE)、相对偏差(BIAS)的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean absolute error (MAE) and relative bias (BIAS) of 66 meteorological stations in Xinjiang at monthly scale

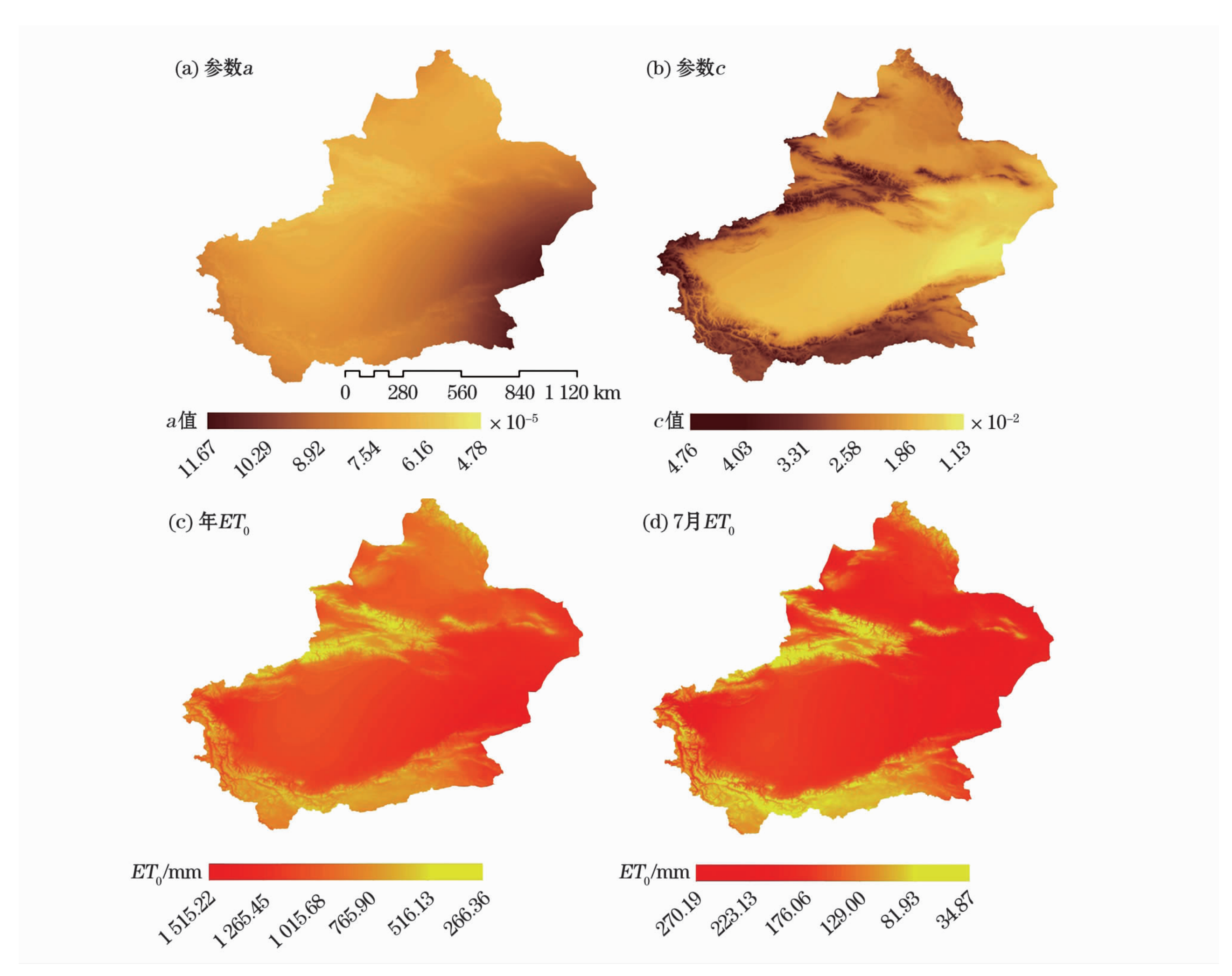


图 4　参数 a、c 和新疆地区年 ET_0 和 7 月 ET_0 的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of the parameters a and c, and the annual ET_0 and ET_0 in July in Xinjiang

年平均气温较高,蒸发量明显偏大;而北疆地处中温带,纬度高,全年平均气温较低,相对湿润,潜在蒸散发较低。

(3) 蒸散发最强烈的月份 7 月,新疆 ET_0 均值为 164 mm,其空间分布与多年平均 ET_0 相似,呈现出平原区高,山区低的特点,而平原区中南北疆的蒸发量相近。相比较全年 ET_0 的空间变化,7 月份的 ET_0 空间变化更加明显,分异也更显著(图 4d)。

2.3　基于参数方程的 ET_0 空间插值数据的精度分析

以 PM 公式计算的 ET_0 值为标准,分析了 MOD16A2 和 CRU 数据对月平均潜在蒸散发的拟合精度(图 5)。结果表明:MOD16A2 数据的 ET_0 产品与 ET_{0_pm} 的决定系数 R^2 均值为 0.87,由于 MOD16A2 数据在裸地、荒漠及高山积雪层的缺失,仅能提取 46 个站点的 ET_0 值,其中有 31 个站点 R^2 值大于 0.90。相较 MOD16A2 数据而言,CRU 数据产品表现更佳,决定系数 R^2 均值为 0.95,66 个站点中有 63 个站点的 R^2 值大于 0.90。

ET_{0_pm} 与 ET_{0_mod}、MOD16A2 数据和 CRU 数据的决定系数 R^2(表 1)分析结果表明:CRU 数据的 R^2 均值在三者中最高,为 0.95,其中有 95.45% 的站点 R^2 值大于 0.90;参数方程仅次于 CRU 数据,R^2 均值为 0.94,但有 96.97% 的站 R^2 值大于 0.90;而 MOD16A2 的 R^2 均值为 0.87,只有 67.39% 站点 R^2 值大于0.90。另外,不同计算方式下的平均绝对偏差 MAE值在不同范围的站点个数也各不相同(表2),

表 1　不同 ET_0 计算方式 R^2 值的分段站点个数

Tab. 1　Number of the segmented meteorological stations for R^2 of different ET_0 calculation methods

ET_0 计算方式	站点总数	不同 R^2 值对应的站点数			
		<0.50	0.50~0.70	0.70~0.90	0.90~1.00
参数方程	66	0	0	2	64
MOD16A2	46	1	7	7	31
CRU	66	0	1	2	63

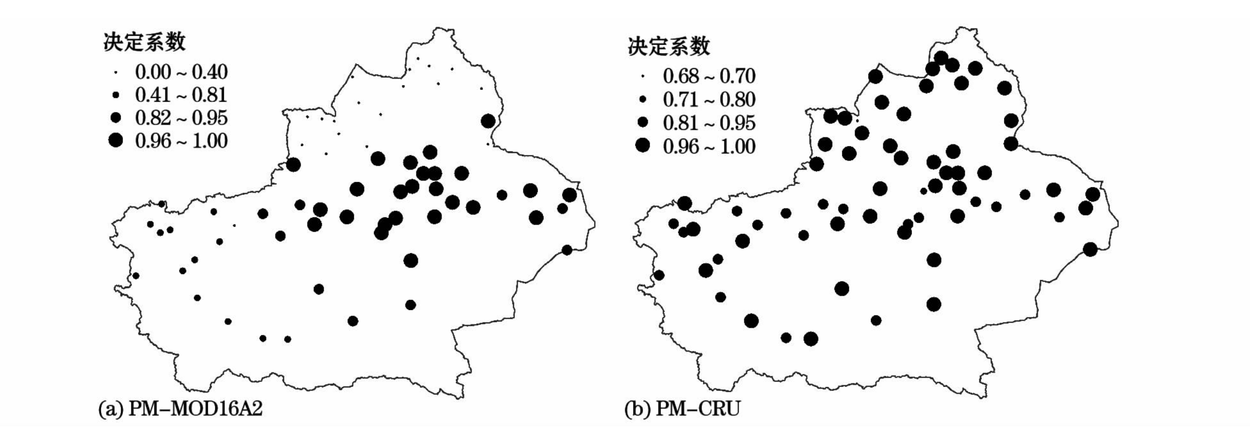


图 5　PM 公式计算的 ET_0 与 MOD16A2 和 CRU 提取的 ET_0 间决定系数的对比

Fig. 5　Compared results of the determination coefficients between ET_0 calculated by Penman-Monteith formula and ET_0 extracted by MOD16A2 and CRU

当 MAE≤0.50 时,CRU 和 MOD16A2 数据的站点数分别为 41 和 0 个,而参数方程在该范围内的站点数有 58 个,占总数的 87.88%。各种计算方式的相对偏差(BIAS)也存在差异,参数方程的 BIAS 为 0.015 4,MOD16A2 数据为 0.21,CRU 数据为 -0.006 5。

2000—2014 年,CRU 数据、MOD16A2 数据和参数方程与 PM 公式计算的 ET_0 月均值散点图(图 6)

表 2　不同 ET_0 计算方式 MAE 值的分段站点个数

Tab. 2　Number of the segmented meteorological stations with MAE values of different ET_0 calculation methods

ET_0 计算方式	站点总数	不同 MAE 值对应的站点数			
		≤0.50	0.50 ~ 1.00	1.00 ~ 2.00	2.00 ~ 5.50
参数方程	66	58	8	0	0
MOD16A2	46	0	2	22	22
CRU	66	41	17	5	3

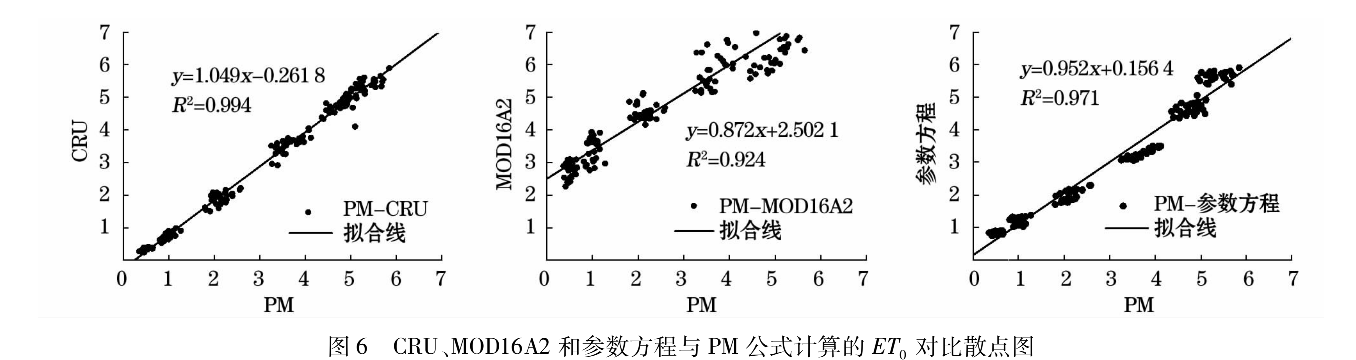


图 6　CRU、MOD16A2 和参数方程与 PM 公式计算的 ET_0 对比散点图

Fig. 6　Comparison scatter plot between CRU, MOD16A2 and parameter formula with the ET_0 calculated by Penman-Monteith formula

表明:CRU 数据和参数方程拟合效果明显优于 MOD16A2 数据,而 MOD16A2 数据出现了对 ET_0 值的高估。通过以上分析得出,参数方程相比其他 2 种数据产品(CRU、MOD16A2),决定系数 R^2 值大于 0.90 的站点个数以及绝对平均偏差 MAE 值小于 0.50的站点数都较高,因而拟合效果较好。

3　讨论与结论

3.1　讨论

目前,潜在蒸散发估算方法主要分为 3 种类型[6]:① 基于辐射的方法,包括 Priestley-Taylor 、Makkink 及 Turc 法[14-15,25]。② 基于温度的方法,包括 Thornthwaite 和 Blaney-Criddle 公式[12-13]。③ 基于辐射、温度和空气动力学项的 Penman-Monteith 方法[26]。Penman-Monteith 方法具有很好的物理机制[7],计算精度高,常被作为 ET_0 估算的标准。然而,Penman-Monteith 方法的最大缺点在于过度依赖观测数据,在缺少资料地区难以推广和应用[11]。另一方面,区域 ET_0 的高精度空间插值一直以来都是挑战[27],目前多数研究都是针对已知站点的插值运算[28-30]。如 Mcvicar 等[31]运用 PM 公式估算了黄河流域的 ET_0,并进行了空间栅格运算,得到了黄河

流域月尺度上 ET_0 的空间分布。虽然一些数据产品(如 MOD16A2、CRU)可提供空间化 ET_0,但其精度与空间分辨率较低[21,32]。本研究所应用的参数化方案,结构简单,数据易获取(仅需要温度和总辐射数据)。而且参数化方程计算精度较高,日、月、季节尺度下的 R^2 值均大于0.90。马亮等[33]在新疆阿克苏地区运用 3 种潜在蒸散发模型计算的 ET_0 与 PM 公式计算的 ET_0 的相关系数低于 0.70。相比较,本文中的研究方法拟合精度较高。除了拟合结果十分接近 PM 公式外,参数方程还可实现 ET_0 的空间栅格运算,与 PM 公式的拟合精度较高,而且分辨率为 500 m,高于 CRU 数据与 MOD16A2 数据的空间分辨率。利用参数方程得到新疆地区的潜在蒸散发空间分布,分布特点是:平原区大于山区;南疆高于北疆,符合新疆地区 ET_0 空间分布特征,与张山清等[34]研究结果一致。

参数方程是由彭曼公式演化而来,简化参数方程中参数 a、c 的空间变化有一定的规律。参数 a 和太阳辐射相关,呈现出东南高、西北低的特点,与新疆总辐射的空间分布相近[35];参数 c 与海拔有关,海拔越高,参数 c 越大。这是由于参数 c 与温度呈负相关,而温度与海拔呈负相关,海拔越高温度越低,因而参数 c 与海拔高度存在正相关关系,参数 a、c 在空间分布上总体符合气象因素的变化规律,具有一定的参考价值[8]。

参数方程可为 ET_0 空间插值运算提供可靠支撑,当某研究区域缺乏 PM 公式所需数据集时,这种方程将有可能成为替代 PM 公式的方法[11],经过校准后的模型参数更符合当地的气候条件,并为一些表征干旱程度的指标提供参考,如干燥度指数[21]、水文模型等。综上所述,参数方程的优点是结构简单,数据易获取,计算精度高。在观测手段不断进步、观测网络逐渐完善的背景下,简化参数方程在站点和区域尺度的 ET_0 计算上具有更大的应用价值和潜力。

3.2　结论

本文通过新疆 66 个站点 1960—2017 年的气象观测数据,评价和校准了简化参数方程的适用性,重点分析了参数方程、CRU 数据和 MOD16A2 数据与 PM 公式间的拟合程度,得出以下结论:

(1) 参数方程与 PM 公式在日、月及季节尺度上的拟合效果都表现较好,R^2 值均大于 0.90,且 R^2 值随时间尺度的增加而增大。ET_{0_pm} 与 ET_{0_mod} 的 MAE 和 BIAS 均值分别为 0.38 和 0.016 0,总体偏差较小,拟合结果较优。

(2) 参数 a、c 经空间插值后,在空间分布上呈现一定规律,参数 a 呈现东南高,西北低的特点,与太阳辐射的空间变化规律相似,随着太阳辐射的降低而减小;参数 c 的空间分布则随着海拔高度的增加而增大。通过参数方程的空间插值得到新疆 ET_0 的空间分布总体表现为南疆大于北疆,平原区大于山区的格局。

(3) 评价了参数方程、CRU 数据和 MOD16A2 数据与 PM 公式的拟合效果及偏差程度,参数方程在拟合效果和空间分辨率方面表现更佳,R^2 大于 0.90,空间分辨率为 500 m × 500 m,可以提高 ET_0 的计算精度和空间分辨率。参数方程适用于新疆地区的潜在蒸散发计算,为气象资料缺乏地区提供了一种结构简单,数据容易获取的 ET_0 估算新方法。

参考文献(References):

〔1〕 Jiang C, Nie Z, Mu X, et al. Potential evapotranspiration change and its attribution in the Qinling Mountains and surrounding area, China, during 1960 – 2012〔J〕. Journal of Water & Climate Change, 2016, 7(3): 526 – 541.

〔2〕 Lv M X, Ma Z G, Lv M Z. Effects of climate/land surface changes on streamflow with consideration of precipitation intensity and catchment characteristics in the Yellow River Basin〔J〕. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123 (4): 1 942 – 1 958.

〔3〕 武建军,耿广坡,周洪奎,等. 全球农业旱灾脆弱性及其空间分布特征〔J〕. 中国科学:地球科学,2017,47(6):733 – 744.〔Wu Jianjun, Geng Guangpo, Zhou Hongkui, et al. Global agricultural drought vulnerability and spatial distribution characteristics〔J〕. Scientia Sinica Terrae, 2017, 47(6): 733 – 744.〕

〔4〕 Malamos N, Tegos A, Tsirogiannis I L, et al. Implementation of a regional parametric model for potential evapotranspiration assessment〔C〕//Montesano F F, Lamaddalena N. IrriMed 2015 – Modern Technologies, Strategies and Tools for Sustainable Irrigation Management and Governance in Mediterranean Agriculture. Bari: Ciheam Valenzano, 2015: 1 – 11.

〔5〕 刘远,周买春. 空间插值气象数据在 Shuttleworth-Wallace 潜在蒸散发模型中的应用〔J〕. 水利水电科技进展,2017,37(1): 8 – 16.〔Liu Yuan, Zhou Maichun. Application of spatially interpolated meteorological data in estimation of potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model〔J〕. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 8 – 16.〕

〔6〕 Mcmahon T A, Finlayson B L, Peel M C. Historical developments

of models for estimating evaporation using standard meteorological data[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Water,2016,3(6):788 –818.

[7] Allen R G,Pereira L S,Raes D,et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Italy:Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome,1998:15.

[8] Tegos A,Malamos N,Efstratiadis A,et al. Parametric modelling of potential evapotranspiration:A global survey[J]. Water,2017,9(10):795.

[9] Hao X M,Zhang S H,Li W H,et al. The uncertainty of Penman-Monteith method and the energy balance closure problem[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2018,123(14):7 433 –7 443.

[10] 王永东,邱永志,许波,等. 参考作物蒸散量计算方法在极端干旱区的适用性[J]. 干旱区研究,2014,31(3):390 – 396. [Wang Yongdong,Qiu Yongzhi,Xu Bo,et al. Reference crop evapotranspiration in hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research,2014,31(3):390 –396.]

[11] Tegos A,Malamos N,Koutsoyiannis D. A parsimonious regional parametric evapotranspiration model based on a simplification of the Penman-Monteith formula[J]. Journal of Hydrology,2015,524:708 –717.

[12] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review,1948,38(1):55 –94.

[13] Heydari M M,Tajamoli A,Ghoreishi S H,et al. Evaluation and calibration of Blaney-Criddle equation for estimating reference evapotranspiration in semiarid and arid regions[J]. Environmental Earth Sciences,2015,74(5):4 053 –4 063.

[14] Ai Z P,Yang Y H. Modification and validation of Priestley-Taylor model for estimating cotton evapotranspiration under plastic mulch condition[J]. Journal of Hydrometeorology,2016,17(4):1 281 – 1 293.

[15] Alexandris S,Stricevic R,Petkovic S. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia,calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula[J]. European Water,2008,21/22:17 –28.

[16] Allen R G,Pruitt W O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering,1986,112(2):139 –155.

[17] Zhao S H,Yang Y H,Zhang F,et al. Rapid evaluation of reference evapotranspiration in Northern China[J]. Arabian Journal of Geosciences,2015,8(2):647 –657.

[18] Haslinger K,Bartsch A. Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves method[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(3):1 211 –1 223.

[19] Tegos A,Efstratiadis A,Koutsoyiannis D. A parametric model for potential evapotranspiration estimation based on a simplified formulation of the Penman-Monteith equation[C]//Alexandris S G. Evapotran Spiration:An Overview. Rijeka:InTech,2013:143 – 165.

[20] Baik J,Choi M. Multi-satellite-based water budget components in south Korea[J]. Environmental Earth Sciences,2018,77:93.

[21] Mccabe G J,Wolock D M. Variability and trends in global drought [J]. Earth and Space Science,2015,2(6):223 –228.

[22] Mu Q Z,Zhao M S,Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment,2011,115(8):1 781 –1 800.

[23] Dhungel R,Allen R G,Trezza R,et al. Comparison of latent heat flux using aerodynamic methods and using the Penman-Monteith method with satellite-based surface energy balance[J]. Remote Sensing,2014,6(9):8 844 –8 877.

[24] Hutchinson M F,Xu T B. Anusplin Version 4.4 User Guide[M]. Canberra:The Austranlian National University,2013:5 –13.

[25] Makkink G F. Ekzameno de la formula de Penman[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science,1957(5):290 –305.

[26] Penman H L. Natural evaporation from open water,bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London,1948,193(1 032):120 –145.

[27] Mcmahon T A,Peel M C,Lowe L,et al. Estimating actual,potential,reference crop and pan evaporation using standard meteorological data:A pragmatic synthesis[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2013,17(4):1 331 –1 363.

[28] 史建国,严昌荣,何文清,等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究,2007,24(6):773 –778. [Shi Jianguo,Yan Changrong,He Wenqing,et al. Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research,2007,24(6):773 –778.]

[29] Wang J,Lv X,Wang J L,et al. Spatiotemporal variations of reference crop evapotranspiration in Northern Xinjiang,China[J]. The Scientific World Journal,2014,2 014:931515,doi:10. 1155/2014/931515.

[30] 普宗朝,张山清,王胜兰,等. 近 48 a 新疆干湿气候时空变化特征[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1 563 – 1 572. [Pu Zongchao,Zhang Shanqing,Wang Shenglan,et al. The spatial-temporal variation characteristic of dry-wet climate in rencent 48 years in Xinjiang Province,China[J]. Journal of Desert Research,2011,31(6):1 563 –1 572.]

[31] Mcvicar T R,Van Niel T G,Li L T,et al. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences[J]. Journal of Hydrology,2007,338(3 –4):196 –220.

[32] Choudhury B J. Global pattern of potential evaporation calculated from the Penman-Monteith equation using satellite and assimilated data[J]. Remote Sensing of Environment,1997,61(1):64 –81.

[33] 马亮,魏光辉. 新疆塔里木盆地西缘参考作物蒸散发模型的适用性评价[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(8):132 – 137. [Ma Liang,Wei Guanghui. Applicability evaluation on the ET_0 model in western margin of Tarim Basin[J]. Journal of Arid Land

Resources and Environment,2015,29(8):132 – 137.〕

〔34〕张山清,普宗朝.新疆参考作物蒸散量时空变化分析〔J〕.农业工程学报,2011,27(5):73 – 79.〔Zhang Shanqing,Pu Zongchao. Temporal and spatial variations characteristics of reference evapotranspiration in Xinjiang〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(5):73 – 79.〕

〔35〕辛渝,赵逸舟,毛炜峄,等.新疆太阳总辐射资料的均一性检验与气候学估算式的再探讨〔J〕.高原气象,2011,30(4):878 – 889.〔Xin Yu,Zhao Yizhou,Mao Weiyi,et al. Homogeneity test of the total solar radiation data series and further research on climatological calculation over Xinjiang〔J〕. Plateau Meteorology,2011,30(4):878 – 889.〕

A Simplified Method and Its Application for Estimating Potential Evapotranspiration

ZHANG Ying[1,2],　HAO Xing-ming[1],　HUA Ding[1,2],　SUN Hai-tao[1,2],　LI Yu-peng[1,2]

(1. *Stake Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology*,*Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*,*Urumqi* 830011,*Xinjiang*,*China*;

2. *University of Chinese Academy of Sciences*,*Beijing* 100049,*China*)

Abstract:　Potential evapotranspiration plays an important role in estimating the regional water balance and crop water demand and also assessing drought. However,the spatial interpolation of potential evapotranspiration is always a challenge for relevant researches. In this study,a simple parametric model was used to achieve the spatialization of the potential evapotranspiration (ET_0) in Xinjiang based on the observed data from 66 meteorological stations in Xinjiang from 1960 to 2017. The results indicated that:① There was a certain regularity of spatial distribution of the two important parameters a and c of the simplified parametric model. The parameter a was spatially high in the southeast but low in the northwest of Xinjiang. The parameter c,however,was increased with the increase of altitude;② Compared with the Penman-Monteith method,the R^2 values of the simplified parametric model at the daily, monthly and seasonal scales were all higher than 0.90,and they were increased with the increase of time scale;③ The compared results between the fitting results of the simplified parametric model and the CRU data and MOD16A2 data revealed that the R^2 values of the simplified parametric model and of the Penman-Monteith method were high,the fitting results and errors were better,but the R^2 values fitted with CRU and MOD16A2 were low. Moreover,the accuracy of potential evapotranspiration and the spatial resolution (500 m × 500 m) obtained by the simplified parametric model were high. Therefore,the simplified parametric model is a convenient and effective model for calculating the ET_0 at regional scale,and can be applied to estimate the potential evapotranspiration in Xinjiang.

Key words:　potential evapotranspiration (ET_0); parametric equation; Penman-Monteith method; spatial interpolation